



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

## ŘÍZENÍ ROBOTICKÉ RUKY POMOCÍ VIRTUÁLNÍ REALITY

ROBOTIC HAND CONTROL USING VIRTUAL REALITY

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Sláma

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

BRNO 2017

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Mikroelektronika a technologie**

Ústav elektrotechnologie

**Student:** Pavel Sláma

**ID:** 173741

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2016/17

**NÁZEV TÉMATU:**

## Řízení robotické ruky pomocí virtuální reality

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s projektem InMoov a jeho řízením. Využijte robotickou ruku z projektu InMoov pro řízení virtuální realitou. Provedte konstrukci na 3D tiskárně, použijte vhodné akční členy a za použití ovladače LeapMotion a platformy Arduino ruku zprovozněte. Využijte prostředí MyRobotLab.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Podle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 8.6.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.**  
předseda oborové rady

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá možností řešení řízení robotické ruky pomocí virtuální reality. K realizaci je využita protetická ruka z projektu InMoov. Práce popisuje základní výrobní principy 3D tisku a zabývá se materiály vhodnými pro konstrukci zvolené robotické ruky. Popisuje funkci a způsob řízení servomotorů, ovládání za využití platformy Arduino komunikující s počítačem za softwarové podpory prostředí MyRobotLab. Pro snímání pohybu je použit ovladač pro virtuální realitu Leap Motion.

## **Klíčová slova**

Protetická ruka, Robotická ruka, InMoov, 3D tisk, Servomotor, Arduino, MyRobotLab, Leap Motion

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with possible solution of controlling robotic hand with virtual reality. To realize this work is used a prosthetic hand from the InMoov project. This thesis describes basic principles of 3D print technology and deals with materials suitable for manufacturing of a chosen robotic hand. As next describes function and controlling of servos, hand control using prototyping platform Arduino communicating with the computer with MyRobotLab software support. To capture movement is used motion sensor for virtual reality Leap Motion.

## **Keywords**

Prosthetic hand, Robotic hand, InMoov, 3D print, Servo, Arduino, MyRobotLab, Leap Motion

### **Bibliografická citace:**

SLÁMA, P. Řízení robotické ruky pomocí virtuální reality. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Řízení robotické ruky pomocí virtuální reality jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 8. června 2017

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Vyroubalovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, za cenné rady, nápady, připomínky, doporučení a věnovaný čas při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: 8. června 2017

.....  
podpis autora

# OBSAH

<b>Obsah</b>	<b>7</b>
<b>Seznam obrázků</b>	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>10</b>
<b>Úvod</b>	<b>11</b>
<b>1 Protetika</b>	<b>12</b>
1.1 3D tisk vs. protetika .....	12
<b>2 InMoov</b>	<b>13</b>
<b>3 Konstrukce robota InMoov</b>	<b>14</b>
3.1 FDM – Fused Deposition Modeling .....	14
3.2 Materiály pro technologii FDM .....	14
<b>4 Ovládání robota InMoov</b>	<b>16</b>
4.1 Servomotor .....	16
4.1.1 Analogové servomotory .....	16
4.1.2 Digitální servomotory .....	17
4.1.3 Řídící pulzy .....	17
4.2 Arduino .....	18
4.2.1 Arduino Nano .....	18
4.2.2 Arduino Mega .....	20
4.3 Senzory tlaku .....	21
4.3.1 Senzor FSR-400 .....	22
<b>5 Leap Motion</b>	<b>23</b>
5.1 Technická specifikace .....	23
<b>6 Prostředí MyRobotLab</b>	<b>25</b>
6.1 Programovací jazyk Python .....	26
<b>7 Realizace projektu</b>	<b>27</b>
7.1 Tvorba fyzického modelu ruky .....	27

7.1.1	Ruka.....	28
7.1.2	Předloktí.....	28
7.2	Osazení robotické ruky servomotory .....	30
7.2.1	Servomotor MEX-654BB .....	30
7.3	Volba napájecího zdroje .....	31
7.4	Návrh shieldu pro Arduino Nano.....	32
7.5	Shield pro Arduino Mega .....	33
7.6	Propojení s počítačem a oživení .....	34
7.6.1	Použitý skript .....	35
7.7	Cenové rozpětí realizace práce .....	36
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>37</b>
	<b>Literatura</b>	<b>38</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>40</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1	Zastoupení 3D tisku v různých průmyslových odvětvích .....	12
Obr. 2.1	Robot InMoov na UETE.....	13
Obr. 4.1	Náhled na konstrukci servomotoru [12] .....	16
Obr. 4.2	Ukázka řídicích pulzů pro různé polohy výstupní hřídele; převzato z [14], upraveno .....	17
Obr. 4.3	Nákres desky Arduino Nano [17] .....	19
Obr. 4.4	Nákres desky Arduino Mega [20].....	20
Obr. 4.5	Koneček prstu se senzorem tlaku z ESD pěny [21].....	21
Obr. 4.6	Senzor tlaku FSR-400 v krátkém a dlouhém provedení [22] .....	22
Obr. 4.7	Závislost odporu senzoru FSR-400 na síle působící na aktivní plochu [23] .....	22
Obr. 5.1	Náhled na konstrukci ovladače Leap Motion [24].....	23
Obr. 5.2	Drátový model ruky [26] .....	24
Obr. 6.1	Grafické rozhraní programu MyRobotLab .....	25
Obr. 7.1	Blokové schéma navrhovaného řešení projektu .....	27
Obr. 7.2	Trojrozměrný model ruky [29] .....	28
Obr. 7.3	Náhled na rozložený 3D model předloktí [30] .....	29
Obr. 7.4	Schéma zapojení hardwarových komponent .....	29
Obr. 7.5	Detail na osazení servomotorů.....	30
Obr. 7.6	Náhled na osazenou a smontovanou robotickou ruku .....	30
Obr. 7.7	Měření špiček odebíraného proudu na servomotoru.....	31
Obr. 7.8	Návrh servo shieldu pro Arduino Nano .....	32
Obr. 7.9	Servisní potisk shieldu pro Arduino Nano.....	33
Obr. 7.10	Návrh shieldu pro Arduino Mega .....	34
Obr. 7.11	Ukázka funkčnosti projektu .....	35

## SEZNAM TABULEK

Tab. 3.1	Porovnání vybraných vlastností termoplastů ABS a PLA.....	15
Tab. 4.1	Shrnutí parametrů desky Arduino Nano .....	19
Tab. 4.2	Shrnutí parametrů desky Arduino Mega.....	21
Tab. 7.1	Vybrané technické parametry servomotoru MEX-654BB .....	31
Tab. 7.2	Finanční náklady spjaté s realizací projektu .....	36

# ÚVOD

S masivním rozšířením 3D tisku mezi širokou veřejnost, různé nadšence a kutily v posledních letech vzniká řada projektů a konstrukcí tisknutelných na 3D tiskárnách v domácím prostředí. Tyto projekty jsou pak většinou šířeny komunitou, modifikovány a distribuovány volně a zdarma pro nekomerční použití pod licencí open source. Jako nadšenecký projekt vznikl i robot InMoov, který původně přinášel model protetické ruky tisknutelný na kterékoliv 3D tiskárně s dostatečným pracovním prostorem, poté se však rozšířil dále na model robota.

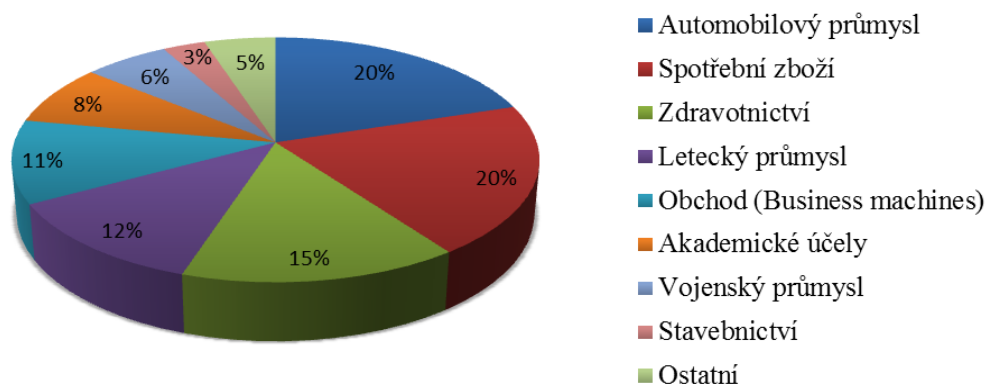
Cílem této práce je seznámit se blíže s projektem InMoov, s jeho přednostmi a možnostmi řízení. Poté využít robotickou ruku z tohoto projektu vyrobenou za užití technologie 3D tisku a řídit ji za pomoci dalšího rozšiřujícího se fenoménu posledních let – virtuální reality.

# 1 PROTETIKA

Protetika je medicínská disciplína zabývající se náhradou chybějících či nedokonale vyvinutých částí lidského těla. Protézy (náhrady) se dají z hlediska funkčnosti jednoduše rozdělit do dvou kategorií, na náhrady kosmetické a funkční. Kosmetické náhrady se používají především pro skrytí vizuálního nedostatku. Dříve se vyráběly ze dřeva, kovu, případně skla. V současnosti se používají moderní materiály na bázi plastů, které jsou lidé schopni vyrobit vizuálně velmi podobné skutečným částem lidského těla na míru konkrétní osobě, včetně umělých chlupů, pórovitého povrchu po vzoru kůže s odstínem pleti dané osoby, dokonce obsahujícím např. pihy, mateřská znaménka, atd. Funkční náhrady mají za úkol co nejpřesněji nahradit chybějící část z funkčního hlediska. Díky technologickému pokroku je možné vyrobit například robotickou protézu ruky, kterou postižený ovládá přímo svalovými pohyby, jež jsou snímány a vyhodnocovány ve vnitřních řídicích obvodech. [1]

## 1.1 3D tisk vs. protetika

Současný trend rychle se rozvíjejícího 3D tisku otevírá nové možnosti v řadě průmyslových odvětví. Jak je z grafu na obrázku 1.1 patrné, největší zastoupení má 3D tisk v automobilovém průmyslu a při výrobě spotřebního zboží. Stále více se také uplatňuje právě ve zdravotnictví [2].



Obr. 1.1 Zastoupení 3D tisku v různých průmyslových odvětvích

3D tisk poskytuje ve zdravotnictví spoustu možností. V současné době se hojně využívá pro výrobu protetických náhrad. Vědci však zkoumají možnosti 3D biotisku, používajícího tzv. bioinkoust – ten obsahuje živé buňky a biopapír sloužící jako podpora. 3D biotisk je v rané fázi vývoje, zkoumají se jeho možnosti vytváření „živých“ náhrad tělesných orgánů, chrupavek, cév, atd. [3]

## 2 INMOOV

InMoov je projekt, který vytvořil v roce 2012 francouzský sochař a designér Gaël Langevin. Z počátku se jednalo o první otevřený (open-source) projekt na světě, zabývající se protetickými náhradami rukou tisknutelných na 3D tiskárnách. V návaznosti na InMoov vznikla řada dalších úspěšných projektů, z nichž za zmínku stojí například Bionico [4] a E-Nable [5]. Obě zmíněné organizace fungují jako neziskové. Vycházejí z modelu ruky InMoov, poskytují potřebné materiály pro její výrobu a zastřešují skupiny dobrovolníků, kteří konstruují protetické náhrady na míru. Od svého počátku se však projekt InMoov rozrostl z pouhé ruky na model robota v životní velikosti, který vychází z anatomie člověka. Model prozatím neobsahuje nohy, robot je umístěn na pohyblivém stojanu s koly. [6]

Na obrázku 2.1 je zobrazen robot InMoov, který se nachází na ústavu elektrotechnologie.



Obr. 2.1 Robot InMoov na UETE

### 3 KONSTRUKCE ROBOTA INMOOV

Celý robot je konstruován z dílů tisknutelných technologií 3D tisku na tiskárnách s minimálním pracovním prostorem o rozměrech 12 x 12 x 12cm. [6]

3D Tisk je aditivní proces výroby trojrozměrných pevných objektů podle digitální předlohy. U aditivního procesu dochází k přidávání materiálu, na rozdíl od běžných obráběcích výrobních postupů, kde se materiál odebírá, dokud těleso nemá požadovaný tvar. Ke vzniku objektu zpravidla dochází nanášením materiálu po tenkých vrstvách spojovaných nejčastěji tavením. S pomocí 3D tisku lze vytvářet náročné tvary a konstrukce, které by se jinými postupy vytvářely obtížně nebo by nebyly realizovatelné vůbec. Postupů, jak zhotovit výrobek aditivním způsobem je několik, mezi nejčastější patří technologie FDM. [7]

#### 3.1 FDM – Fused Deposition Modeling

FDM se pro svůj velice jednoduchý princip stal jedním z nejrozšířenějších způsobů 3D tisku vůbec. Jednoduchost procesu je jeho největší předností oproti jiným technologiím 3D tisku, odvíjí se od ní pořizovací cena zařízení i možnost zkonstruování 3D tiskáren v domácím prostředí. Nevýhodou je nižší přesnost oproti jiným technologiím.

Princip funkce je přirovnatelný ke klasické tavné pistoli. Do extruzní hlavy zařízení je přiváděn materiál (termoplast) ve formě drátu, který je taven a tryskou vytlačován na podložku. Tisk probíhá postupně po tenkých vrstvách, kdy se nanáší obrazec v rovině horizontálního průřezu výrobku, poté se posune podstavec směrem kolmo dolů o tloušťku vrstvy (případně se tisková hlava posune nahoru) a probíhá tisk další vrstvy, postup se opakuje až do vytvoření celého výrobku. [8]

#### 3.2 Materiály pro technologii FDM

Při FDM tisku se využívají různé termoplasty, nejčastěji používané jsou však plasty ABS (Akrylonitril butadien styren) a PLA (Polylaktid) [8].

ABS je polymer z přibližně poloviny složený ze styrenu ( $C_8H_8$ ), druhou polovinu tvoří akrylonitril ( $C_3H_3N$ ) a butadien ( $C_4H_6$ ) v poměru 1:1. Jedná se o pevný, tuhý plast s dobrou mechanickou a chemickou odolností. Vyznačuje se vysokou pevností v tahu rozměrovou stálostí, tvrdostí povrchu i schopností samozhášení. Dobře odolává nízkým i vysokým teplotám, při prudkém ochlazení však může dojít k narušení struktury plastu. Je zdravotně nezávadný a v průmyslu hojně používaný. Bez příměsí má bílou barvu, často se však dobarvuje. Hustota materiálu je  $1045 \text{ kg/m}^3$ , bod tání nelze přesně určit, jelikož se jedná o amorfní látku, standardně se však uvádí teplota okolo  $205^\circ\text{C}$ . Materiál je při tisku taven při teplotě cca  $230^\circ\text{C}$ . Teplota skelného přechodu neboli teplota, po které začne materiál měknout, je přibližně  $105^\circ\text{C}$ . [9]

PLA je polyester vyrobený z obnovitelných zdrojů, je tvořen nejméně z 85 % esterů kyseliny mléčné (získávané z přírodních cukrů a škrobů). Jeho velkou předností

je ekologičnost – je biologicky odbouratelný. PLA ( $C_3H_4O_2$ ) je oproti ABS lesklejší, méně pružný, lépe zpracovatelný a je méně náchylný na deformace vlivem chladnutí. Nevýhodou je menší teplotní odolnost, zejména oproti vyšším teplotám, což je dáno nízkou teplotou skelného přechodu. Ta se u PLA pohybuje v mezích 60 – 65°C. Materiál má hustotu 1250 kg/m<sup>3</sup>, teplotu tání 173-178°C. Vlivem nižší teploty tavení oproti ABS je zpracování PLA méně energeticky náročné, nevýhodou jsou však vyšší pořizovací náklady. [10] Pro porovnání parametrů s ABS slouží tabulka 3.1.

Tab. 3.1 Porovnání vybraných vlastností termoplastů ABS a PLA

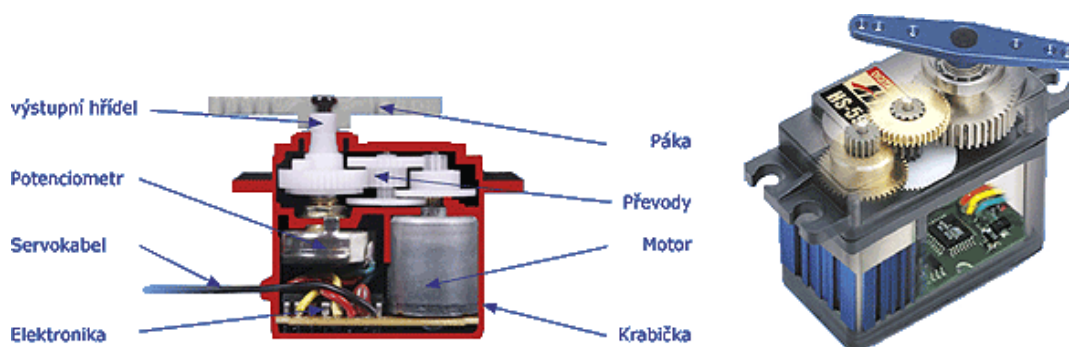
Materiál	ABS	PLA
Hustota	1045 kg/m <sup>3</sup>	1250 kg/m <sup>3</sup>
Teplota tavení	205 °C	175 °C
Teplota skelného přechodu	105 °C	65 °C
Odolnost proti vlhkosti	Mírná absorpce vlhkosti	Velmi vysoká
Struktura povrchu	Hladký povrch	Mírně drsný povrch
Dopad na životní prostředí	Vysoký	Minimální

## 4 OVLÁDÁNÍ ROBOTA INMOOV

Pro kompletní řízení robota jsou standardně použity 2 moduly Arduino Mega. Jako pohonná jednotka se zde využívají modelářské servomotory, v celém robotu jich je osazeno 28. Robot je vybaven dalšími periferiemi, jako jsou například 2 kamery, 2 reproduktory, senzor Kinect snímající pohyb a gestikulaci a další. Obě ruce mají v konečkách prstů zabudované senzory tlaku snímající stisk jednotlivých prstů. [6]

### 4.1 Servomotor

Servomotor (zkráceně servo) se skládá z několika částí. Těmi hlavními jsou motor, převodovka, řídicí elektronika a zpětnovazební potenciometr. [11] Konstrukce servomotoru je znázorněna na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Náhled na konstrukci servomotoru [12]

Pro pohon se používá klasický stejnosměrný motor. K optimalizaci poměru síly ku počtu otáček slouží vestavěná převodovka, standardně mají totiž DC motorky velké množství otáček a malý moment síly. Natočení výstupní hřídele je snímáno potenciometrem, který s ním může být spojen přímo, nebo přes speciální převod. Použitím tohoto tzv. nepřímého náhonu se docílí k zamezení přenosu vibrací. Pro napájení a řízení slouží přívodní servokabel, který je tří žilový – skládá se z napájecího, řídicího a zemnicího vodiče. „Mozkem“ celého serva je řídicí elektronika. Do ní je přiveden řídicí signál a napětí z jezce potenciometru, který slouží jako senzor pro sledování úhlu natočení výstupní hřídele. [11] a [12]

Z hlediska způsobu provedení řídicího obvodu můžeme serva rozdělit do dvou kategorií – na analogové a digitální. Oba typy jsou vzájemně kompatibilní, jelikož se ovládají stejným signálem. [12]

#### 4.1.1 Analogové servomotory

Impulzy, které elektronika přijímá z řídicího vstupu, jsou porovnávány s impulzy, které jsou generovány ve vestavěném monostabilním klopném obvodu. Šířka generovaných pulzů je ovlivňována polohou potenciometru. Komparační (porovnávací) obvod udělá rozdíl obou impulsů. Pokud je jejich šířka totožná, motor se nehýbe. Když



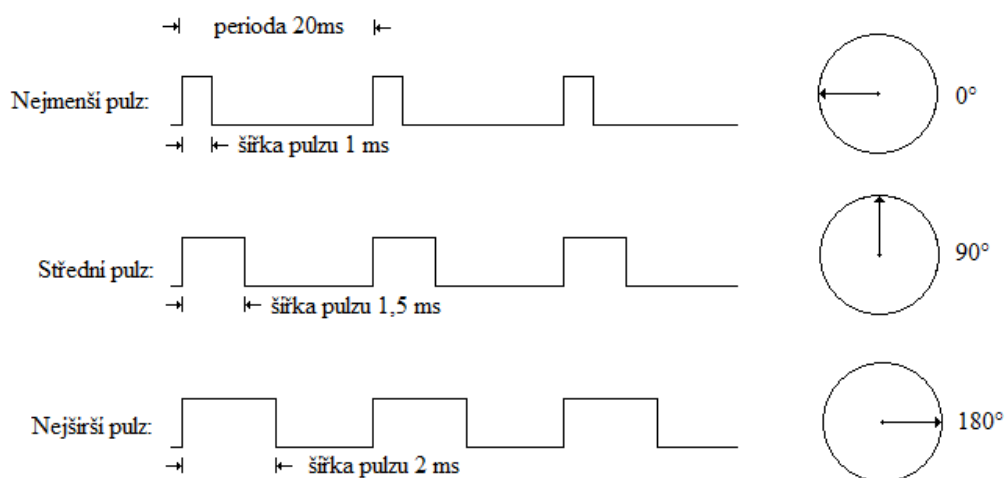
budou generované pulzy užší, než řídící, rozpohybuje se motor na jednu stranu, naopak při širších generovaných pulzech se motor rotočí na opačnou stranu. Čím větší pak bude rozdíl mezi oběma pulzy, tím rychleji se motor bude točit.

### 4.1.2 Digitální servomotory

Digitální servomotory, jak už z názvu vyplývá, jsou vybaveny digitální řídicí elektronikou. Ta sice zpracovává stejné vstupní pulzy jako analogová, ale je oproti ní přesnější, při srovnatelné konfiguraci má však o trochu vyšší spotřebu. Digitální elektronika může být navíc programovatelná, což přináší možnost korigovat některé parametry, jako například neutrální polohu, koncové body, rychlost pohybu či smysl otáčení.

### 4.1.3 Řídící pulzy

Servomotory se obecně řídí PWM signálem. Ideální vstupní signál se skládá z pulzů o frekvenci 50 Hz. Šířka těchto pulzů se běžně pohybuje v rozmezí 1,25 – 1,75 ms. Střední poloha je určena pulzy o šířce cca 1,5 ms. Kvalitnější servomotory, které poskytují větší úhel natočení ( $180^\circ$ ), pracují s pulzy o šířkách cca 1-2 ms. Ukázka těchto řídicích pulzů je zobrazena na obr. 4.2, kde pro nejúžší pulz 1ms se nachází výstupní hřídel v levé krajní poloze ( $0^\circ$ ), ve střední poloze ( $90^\circ$ ) se nachází při délce pulzu 1,5 ms a pro 2 ms se nachází v pravé krajní poloze ( $180^\circ$ ). Tyto hodnoty však nejsou pevně stanovené, vždy záleží na konkrétním typu serva a jeho maximálním natočení.[13]



Obr. 4.2 Ukázka řídicích pulzů pro různé polohy výstupní hřídele; převzato z [14], upraveno

## 4.2 Arduino

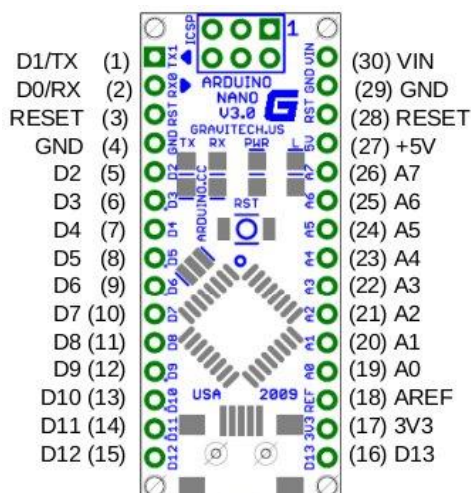
Arduino je otevřená prototypovací platforma pracující s mikrokontroléry založená v roce 2005 v Itálii. Původním cílem celého projektu bylo poskytnutí výukové platformy pro studenty. Arduino zaznamenalo velký úspěch a je neustále vyvíjeno, postupně vznikají další verze. Původně pracovaly všechny desky s mikrokontroléry společnosti Atmel, konkrétně s osmibitovými mikroprocesory ATmega8, ATmega168, ATmega328, ATmega1280 a ATmega2560. V modernějších deskách jsou využity 32bitové ARM procesory Atmel SAM3X8E nebo 32bitové procesory Intel Quark SoC X1000. Existuje řada různých desek, které se od sebe liší typem použitého mikrokontroléru, pamětí flash, EEPROM, počtem vstupně-výstupních pinů, možnými sběrnicemi atd. Z desek obsahujících osmibitové mikroprocesory lze zmínit např. UNO, MEGA, Leonardo, Robot nebo Nano. Sortiment doplňují také desky s 32bitovými procesory, např. ZERO, Due či Galileo.

Desky jsou propojovány s počítačem přes USB port, který je na desce softwarově převeden na RS-232. Programování probíhá právě přes PC, přes vývojové prostředí Arduino IDE. To je naprogramováno v jazyce Java. Prostředí poskytuje několik funkcí, jako je kontrola chyb v kódu, programování samotného mikrokontroléru či sledování provozu na sériové lince. Dále také obsahuje základní knihovny pro práci s deskami Arduino a několik ukázkových programů. Při programování v tomto prostředí se využívá jazyka Wiring, který je podobný jazyku C. Jako vývojové prostředí lze ještě využít Microsoft Visual Studio s nainstalovaným pluginem Arduino. [15]

Pro využití v této práci byly ze sortimentu vybrány dva modely, které by pro realizaci vyhovovaly nejvíce. Prvním uvažovaným modelem je Arduino Nano. Jakožto jedna z nejmenších desek z celé nabídky s rozměry 45 x 18 mm poskytuje dostatek vstupně-výstupních pinů. Malé rozměry navíc poskytují možnost zabudování desky přímo dovnitř protetické ruky. Druhým uvažovaným modelem je podstatně větší deska Arduino Mega poskytující velkou řadu vstupů i výstupů. Na platformě Arduino Mega je postavený originální robot InMoov, takže deska zaručuje stoprocentní kompatibilitu se softwarem i hardwarem a odpadají případné problémy s funkčností.

### 4.2.1 Arduino Nano

Arduino Nano bývá osazeno osmibitovými mikrokontroléry firmy Atmel, a to modely ATmega168 nebo ATmega328. Zásadní rozdíl mezi oběma čipy je v paměti, ATmega328 má dvojnásobek kapacity pamětí Flash, EEPROM i RAM. Desku je možné napájet přes Mini-USB konektor nebo přes vestavěný stabilizátor s přívodem na pinu Vin, na který se přivádí napětí v maximálním rozsahu 6-20 V, doporučeno je však 7-12 V. Jako napájecí zdroj se vybere automaticky ten, na kterém je vyšší napětí. Při zapojení obou variant zároveň bude tedy deska napájena externím zdrojem, nikoliv 5V přívodem přes USB port. Deska obsahuje 14 digitálních vstupně-výstupních pinů, 8 vstupních analogových pinů a až 6 kanálů PWM. Každým výstupním pinem může téct maximální proud až 40mA. Parametry této desky jsou sjednoceny v tabulce 5.1. Při zacyklení programu nebo podobné situaci, kdy přestane mikrokontrolér reagovat lze využít integrované tlačítko Reset na desce. [16]



Obr. 4.3 Nákres desky Arduino Nano [17]

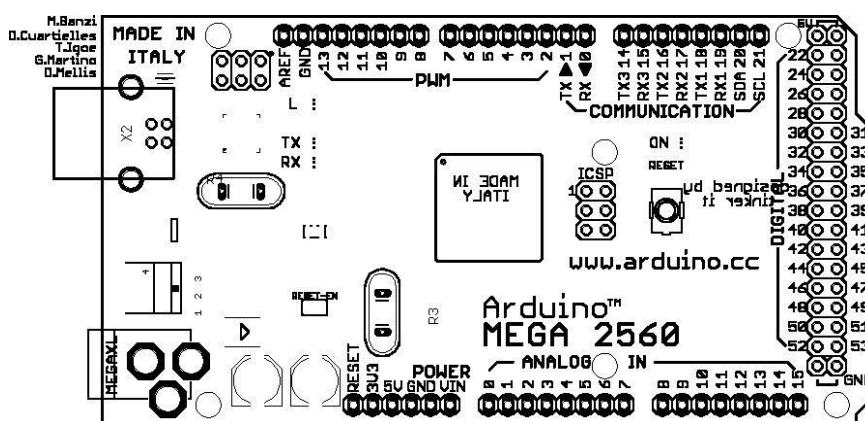
Na obrázku 5.1 je zobrazen nákres desky. Piny D0-D13 (číselně piny 1, 2, 5-16) jsou digitální vstupně-výstupní, z nichž piny 3, 5, 6, 9, 10, 11 mohou sloužit jako PWM výstupy. Analogové piny jsou označeny A0-A7 (19-26). Piny 3 a 28 slouží pro resetování desky. Pin VIN (30) slouží pro napájení. Piny 4 a 29 (GND) jsou napájecí vodiče s nulovým potenciálem (zemníci). Pin 17 slouží jako výstupní zdroj napětí 3,3V, obdobně pin 27 slouží jako výstup napětí 5V, může být ale využit i jako napájecí přívod pro celou desku. Pin AREF (18) slouží jako přívod pro referenční napětí pro AD převodník. [16]

Tab. 4.1 Shrnutí parametrů desky Arduino Nano

Mikrokontrolér	ATmega168	ATmega368
Takt hodinového signálu	16 MHz	
Paměť Flash	16 KB	32 KB
Paměť EEPROM	512 Bytů	1 KB
Paměť SRAM	1 KB	2 KB
Doporučený rozsah napájecího napětí (maximální)	7-12 V (6-20 V)	
Logická úroveň napětí	5 V	
Maximální výstupní proud pinů	40 mA	
Rozměry	45 x 18 mm	
Hmotnost	5 g	

## 4.2.2 Arduino Mega

Deska Arduino Mega se nachází v několika různých variantách. Původní deska bývá osazena mikrokontrolérem ATmega1280, novější verze Arduino Mega 2560 je osazena mikroprocesorem ATmega2560. S rozměry 101,52 x 53,3 mm se řadí mezi větší desky z portfolia Arduina. Obsahuje však bohaté množství vstupů a výstupů, konkrétně 54 digitálních vstupně-výstupních pinů, z nichž až 15 pinů poskytuje režim PWM a 16 analogových vstupních pinů. Komunikaci Arduina s jinými periferiemi zajišťují především 4 hardwarové sériové porty UART, s vyznačenými piny pro příjem (receive - RX) a odesílání (transmit - TX) dat v 5V TTL logice. Dále deska podporuje komunikaci přes USB konektor skrz virtuální sériový port zajištěný čipem ATmega16U2 (pro verzi desky Arduino MEGA 2560 Rev. 3). Na desce je osazen 16MHz krystal, USB konektor pro komunikaci s PC a programování, napájecí konektor, tlačítko reset, a další. Na obrázku 4.4 je zobrazen náhled na desku Arduino Mega a v tabulce 4.2 jsou shrnuty její technické parametry. [18] a [19]



Obr. 4.4 Náčrten desky Arduino Mega [20]

Všechny piny jsou rozmístěny po obvodu desky a uspořádány do skupin, což znázorňuje i potisk desky zobrazený na obrázku 4.4. Pro napájení je zde vyčleněno několik pinů nacházejících se dole vlevo. Pin označený 5V je pětivoltový výstup z integrovaného stabilizátoru se vstupním napětím v rozsahu 6-20 V, obdobně pin 3V3 poskytuje napětí 3,3 V s maximálním proudovým zatížením 50 mA. Pin GND je zemnicí s nulovým potenciálem. Vin je přímo napojený na napájecí konektor a přes tento pin se dá k tomuto napětí přistupovat. Dále směrem napravo se nachází skupina 16 analogových vstupních pinů, očíslovaných 0 – 15. Po pravé straně desky se nachází digitální vstupně-výstupní piny. Nahoře se zprava nachází skupina pinů určených pro komunikaci, jsou zde obsaženy piny pro sériové porty, označeny čísly 0, 1, 14 – 19. Vlevo se nachází skupina digitálních vstupně-výstupních pinů podporující PWM mód, další pin GND a pin AREF, sloužící jako vstup pro referenční napětí AD převodníku. PWM kanály se nachází na digitálních pinech očíslovaných 2 – 13, 44 – 46. [18] a [19]

Tab. 4.2 Shrnutí parametrů desky Arduino Mega

Mikrokontrolér	ATmega1280	ATmega2560
Takt hodinového signálu	16 MHz	
Paměť Flash	128 KB	256 KB
Paměť EEPROM	4 KB	
Paměť SRAM	8 KB	
Doporučený rozsah napájecího napětí (maximální)	7-12 V (6-20 V)	
Logická úroveň napětí	5 V	
Maximální výstupní proud pinů	40 mA	20 mA
Rozměry	101,52 x 53,3 mm	
Hmotnost	37 g	

### 4.3 Senzory tlaku

V projektu InMoov jsou v konečcích prstů vestavěné senzory tlaku. Důvod je zřejmý, bez zpětné odezvy o síle stisku nějakého předmětu by mohlo snadno dojít k mechanickému poškození jak stisknutého předmětu, tak samotné ruky a vestavěných mechanismů.

Tyto senzory jsou tvůrcem robota InMoov řešeny za použití antistatické vodivé pěny, která se běžně dodává k zakoupeným integrovaným obvodům a součástkám citlivým na statické výboje. Takové řešení je zobrazeno na obrázku 4.5, kde je ukázán detail na koneček prstu robota. ESD pěna je běžně vyráběná z polyethylenu (PE) či polyuretanu (PU) a obsahuje uhlíková vodivá vlákna. Pěna se vyznačuje vysokou rezistivitou řádově cca  $10^6 \Omega$ , při jejím stlačování se však zmenšují mezery mezi jednotlivými vlákny a dochází k poklesu rezistivity až o několik řádů. Tato změna je pro mikrokontrolér dostačující pro práci s analogovým signálem. Pěna je v konečku prstu umístěna mezi dvě malé kovové destičky sloužící jako elektrody připojené k vodičům. Výhodou tohoto řešení jsou nízké až nulové náklady, nevýhodou může být nepřesnost snímání či životnost. Mnohem výhodnějším a sofistikovanějším řešením je použít přesný tlakový senzor, jehož cena se však pohybuje v řádu několika stovek korun. [21]



Obr. 4.5 Koneček prstu se senzorem tlaku z ESD pěny [21]

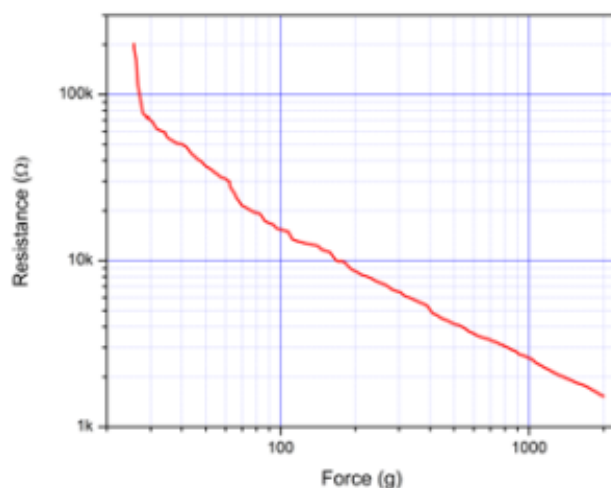
### 4.3.1 Senzor FSR-400

Jedná se o senzor tlaku od firmy Interlink Electronics z produktové řady FSR-4xx. Tyto senzory principiálně pracují jako rezistory s proměnnou hodnotou odporu závislou na síle stlačení působící na jejich aktivní plochu. Senzor FSR-400, zobrazený na obrázku 4.6, má tvar kruhu, další senzory této řady mají například čtvercové či páskové provedení.



Obr. 4.6 Senzor tlaku FSR-400 v krátkém a dlouhém provedení [22]

Průměr senzoru je 7,6 mm, průměr aktivní plochy 5,08 mm, délka senzoru i s vývody pak činí 38,1 mm v dlouhém provedení a 15,8 mm v krátkém. Tloušťka senzoru dosahuje 0,5 mm a v daném rozsahu působící síly (0,1 – 20) N se změní až o 0,05mm. Na obrázku 4.7 je zobrazena závislost odporu senzoru na síle stlačení. Hodnota odporu téměř lineárně klesá a mění se v rozsahu přibližně dvou řádů. [22]



Obr. 4.7 Závislost odporu senzoru FSR-400 na síle působící na aktivní plochu [23]

## 5 LEAP MOTION

Leap motion je produkt stejnojmenné americké společnosti. Jedná se o ovladač snímající pohyb lidské ruky, který je primárně určen pro virtuální realitu. Vzhledem k faktu, že virtuální realita je rychle se rozvíjející trend současné doby, ovladač je vyvíjen pro podporu široké škály zařízení. V současnosti je ovladač kompatibilní s osobními počítači s operačními systémy Windows, Mac OS X i Linux, s mobilními zařízeními pracujícími na systému Android a s některými brýlemi pro virtuální realitu, jako jsou například brýle Oculus Rift či HTC Vive. Široká podpora různých zařízení dodává ovladači velký potenciál pro práci s virtuální realitou. Postupně vznikají nové aplikace a hry napříč všemi zařízeními. [24] a [25]



Obr. 5.1 Náhled na konstrukci ovladače Leap Motion [24]

### 5.1 Technická specifikace

Ovladač Leap Motion je malá „krabička“ ve tvaru obdélníku o rozměrech 80 x 30 mm a tloušťce 11,25 mm. Jeho konstrukce je naznačena na obrázku 5.1. S počítačem, případně jinými zařízeními, komunikuje pomocí USB portu. Existuje i bezdrátová varianta s vestavěným Li-Ion akumulátorem, která pro komunikaci používá technologii Bluetooth a k nabíjení USB konektor. Při použití je zařízení položeno na podložce (např. na stole), čelní stranou nahoru. Ta je vyplněna sklem, pod kterým jsou umístěny 3 infračervené LED diody a 2 infračervené kamery. Zařízení snímá do vzdálenosti přibližně jeden metr a pozorovací úhly činí 150°, čímž nad ovladačem vzniká poměrně velká snímaná oblast. LED diody osvětlují tento prostor infračerveným světlem, světlo odražené od rukou zpět je snímáno IR kamerami rychlostí až 200 snímků za vteřinu. Data posbíraná kamerami jsou odesílána do připojeného zařízení, např. do počítače. Ovladač je schopen záraz rozeznat všech 10 prstů a rozpozná změnu jejich pohybu do 0,25 mm. [25]

V ovladači jsou data nasnímaná senzory zpracovávána. Souběžné snímky z obou infrakamer jsou porovnány a za pomoci matematických algoritmů zpracovávány. Výsledkem těchto operací je souhrn dat určující polohu prstů, obsahující vektory nesoucí informaci nejen o jednotlivých prstech a jejich přesné poloze, ale i sestavené a dopočítané vektory jednotlivých kostí a kloubů. Z těchto dat je následně sestavován drátový model ruky, příklad takového modelu je ukázán na obrázku 5.2. Každý prst je tedy určen všemi klouby a bodem na konečku prstu – na obrázku jsou tyto body zobrazeny jako zelené kuličky. Ty jsou potom spojeny „dráty“ reprezentující jednotlivé kosti. Pro zjednodušení modelu se neurčují všechny kosti v ruce, ale pouze články prstů. Zápěstní kosti nejsou pro sledování pohybu ruky směrodatné a celé zápěstí je pak určeno pouze dvěma trojrozměrnými vektory – polohou dlaně (palm position), která určuje hmotný střed dlaně a polohou zápěstí (wrist position), která slouží jako bod, kolem kterého se celá dlaň otáčí. Ovladač si tento drátový model uchovává a dále s ním pracuje. Dochází k porovnávání a ověřování dat snímaných senzory v ovladači vůči tomuto vnitřnímu modelu ruky. Tím je ovladači umožněno sledovat pozici prstů i při neúplné viditelnosti prstu a dochází k zpřesnění snímání pohybu. [26]



Obr. 5.2 Drátový model ruky [26]

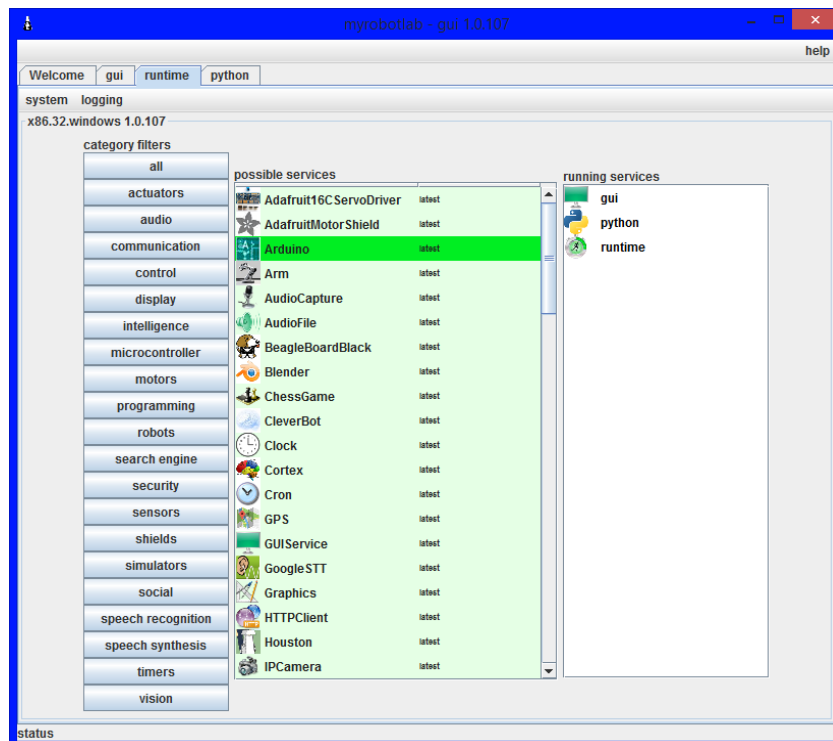


## 6 PROSTŘEDÍ MYROBOTLAB

MyRobotLab je otevřené (open-source) vývojové prostředí určené pro robotiku. Celý program je napsán v jazyce Java a pro práci potřebuje zařízení s nainstalovanou aplikací Java verze 1.7 a vyšší. Aplikaci lze použít na zařízeních s operačními systémy Windows, MAC OS X i Linux.

Program MyRobotLab poskytuje pomocí vestavěných modulů podporu rozeznání hlasu, převodu textu na řeč, ovládání krokových motorů a serv a zajišťuje komunikaci s mikrokontroléry. Prozatím jsou podporovány pouze mikrokontroléry na deskách Arduino. Jelikož je program pod licencí open-source, je otevřen přidávání vlastních modulů a může tak být dále rozšiřován. Celá aplikace navíc obsahuje moduly vytvořené přímo pro robota InMoov, poskytuje základní knihovny pro práci s jakoukoliv jeho částí, a také modul pro komunikaci s ovladačem Leap Motion. Programování kódů v tomto prostředí probíhá v jazyce Python. [27]

Na obrázku 6.1 je zobrazeno grafické rozhraní vývojového prostředí MyRobotLab, které je členěno do záložek. Na obrázku je zobrazeno prostředí s aktivní záložkou „runtime“, ze které jdou spouštět libovolné služby z nabídky poskytovaných modulů. Zeleně je zvýrazněna služba pro desky Arduino, pravým kliknutím myši na tuto službu se objeví kontextová nabídka, volbou „Start“ lze službu spustit a nakonfigurovat. Po spuštění nové služby se pro ni vytvoří samostatná záložka, která slouží pro práci s modulem.



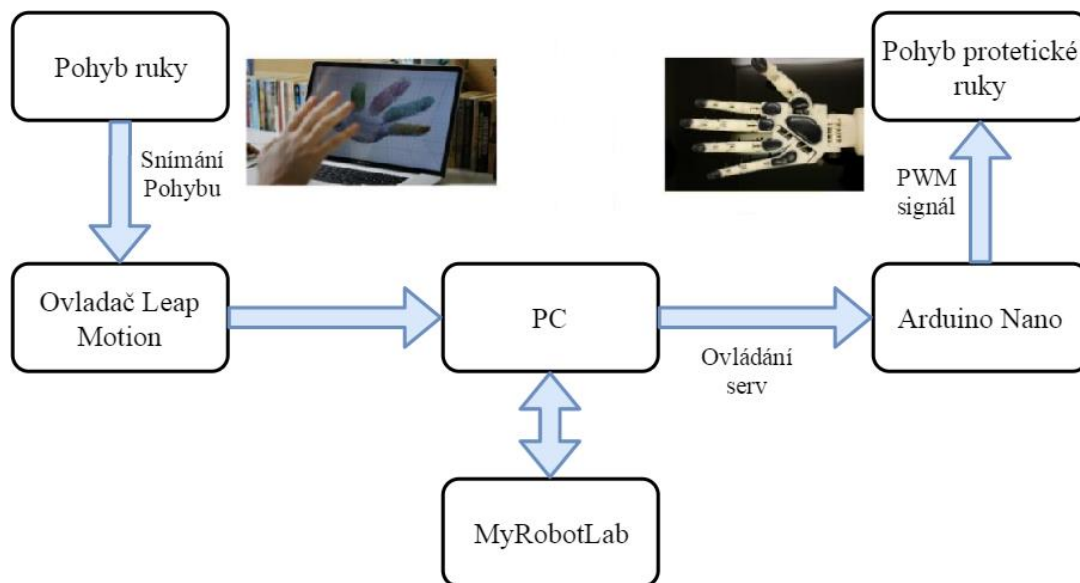
Obr. 6.1 Grafické rozhraní programu MyRobotLab

## 6.1 Programovací jazyk Python

Python je skriptovací jazyk. V roce 1991 jej navrhl holandský informatik a programátor Guido van Rossum s cílem vytvořit snadný, srozumitelný a intuitivní programovací jazyk schopný konkurovat i těm nejrozšířenějším jazykům. Python je veden pod licencí open-source a je dále vyvíjen. Pro svou jednoduchost se stal oblíbeným, je dokonce považován za výborný jazyk pro začátečníky a bývá používán pro výuku programování. Hodí se pro psaní krátkých kódů i rozsáhlých aplikací. Python se jednoduše vkládá do jiných programovacích jazyků, kde slouží jako jejich skriptovací jazyk. Skvěle spolupracuje s jazyky C a Java. [28]

## 7 REALIZACE PROJEKTU

Návrh řešení zadání je zobrazen v blokovém schématu na obrázku 7.1. Při řízení jsou použity komponenty, hardwarové i softwarové, popisované v této práci. Cílem je vytvořit systém, který bude schopný převést pohyb lidské ruky na pohyb protetické ruky.



Obr. 7.1 Blokové schéma navrhovaného řešení projektu

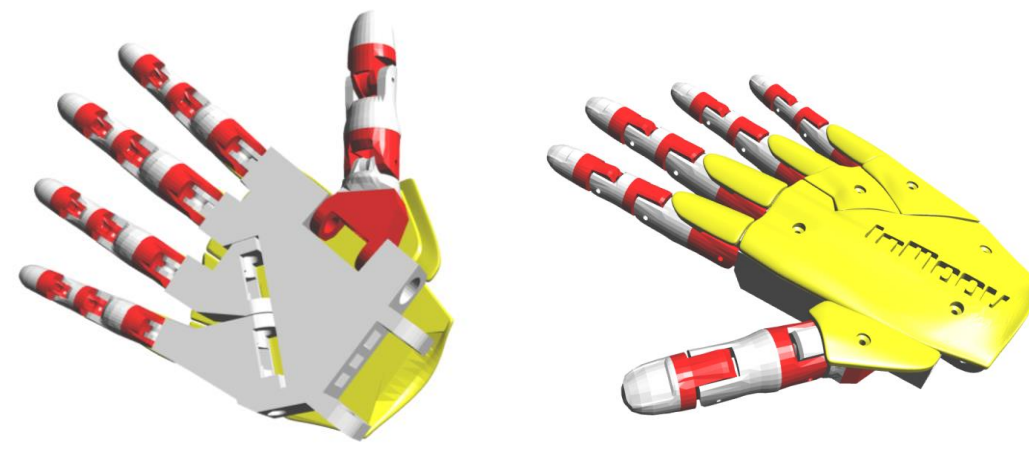
Pohyb lidské ruky je snímán ovladačem Leap Motion. Ten pak nasnímaná data pošle do počítače. V počítači probíhá analýza těchto dat, rozpoznání prstů a určení pohybu. Za softwarové podpory vývojového prostředí MyRobotLab probíhá vyhodnocení změny pohybu a vygenerování dat pro platformu Arduino. Arduino tyto data převede na PWM signály určené pro servomotory uvnitř protetické ruky, které se starají o její pohyb.

### 7.1 Tvorba fyzického modelu ruky

Pro účely této práce je využita pravá ruka robota InMoov vytištěná na 3D tiskárně, jako materiál byl zvolen termoplast PLA, rozhodujícím kritériem byla především ekologičnost materiálu i přes vyšší pořizovací cenu. Trojrozměrný model použitý pro získání obrázků 2.1 a 2.2 je vytvořen právě pro ruku pravou, konstrukce levé ruky je totožná, pouze jsou všechny díly zrcadlově převráceny. Aby byly náhledy podrobnější, jsou rozděleny do dvou obrázků – na předloktí a na samotnou ruku (dlaň).

### 7.1.1 Ruka

Ruka robota je, stejně jako ta lidská, složena z pěti prstů, dlaně a zápěstí (Obr. 7.2).

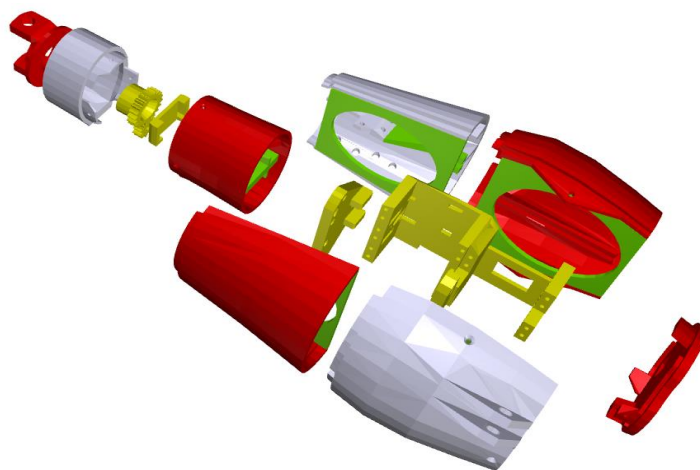


Obr. 7.2 Trojrozměrný model ruky [29]

Každý prst je složen ze tří článků (palec ze dvou), které mohou být spojeny v kloubech šrouby o rozměru M3, v této realizaci je však použito nýtů vytvořených z plastové struny (PLA) využitě pro tisk materiálu. Takové nýty představují jednodušší řešení, nižší náklady oproti šroubům a poskytují dostatečnou pevnost pro spojení článků prstů. Dodatečné tři klouby v dlani u malíčku, prostředníčku a palce, které umožňují reálnější ohyb prstů a dlaně, jsou spojeny šrouby s rozměry M8. Každý prst je ovládán samostatně pomocí lanka, kde je použita rybářská pletená šňůra na lov sumců, poskytující velkou pevnost v tahu až několik desítek kilogramů. Na konci každého prstu je umístěn senzor pro snímání tlaku, který slouží pro zpětnou odezvu při uchopení předmětu. Bez něj by mohlo dojít k poškození drobnějších a křehčích předmětů vlivem silného stisku. Dráty k senzorům i lanka jsou vedeny dutinkami uvnitř prstů a vnitřkem dlaně, skrz zápěstí pak vedou do předloktí.

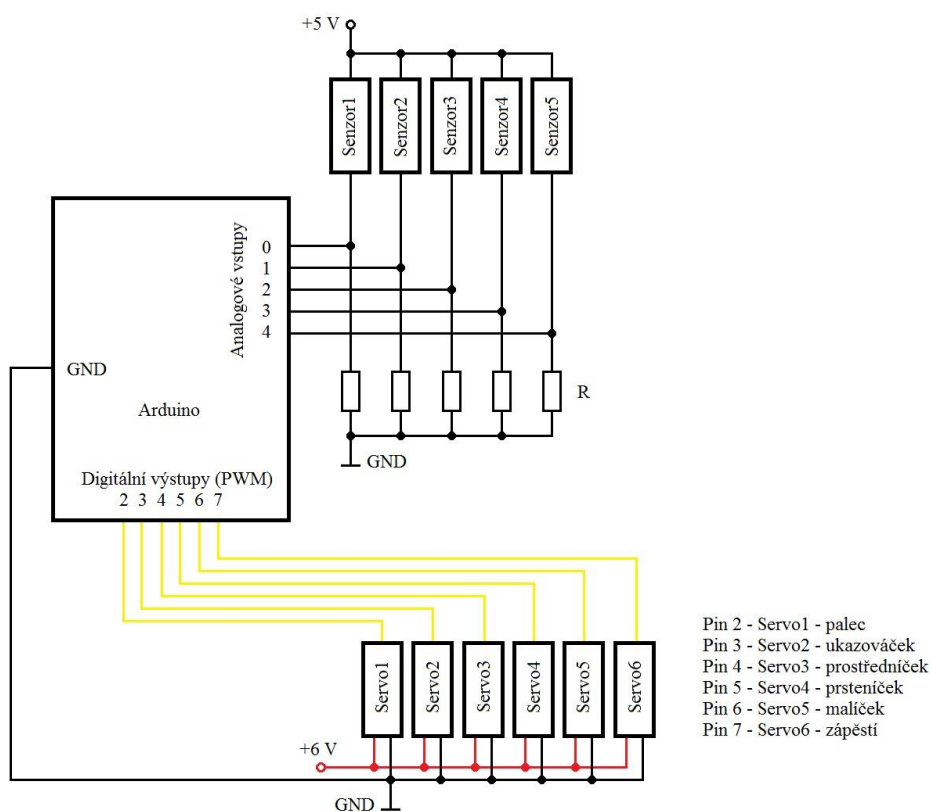
### 7.1.2 Předloktí

Náhled na předloktí je zobrazen na obr. 7.3. Předloktí obsahuje lůžko pro pět servomotorů ovládajících motoriku prstů. Od samotného lůžka až po zápěstí jsou v konstrukci vytvořeny vodící drážky a otvory pro lanka a drátky. Zápěstí obsahuje lůžko pro další servomotor. Je zkonstruováno tak, aby se dlaň mohla natáčet okolo osy v rozsahu úhlu až 90°. Díly pláště předloktí, jednotlivé díly lůžka pro serva a některé další díly jsou lepeny dvousložkovým epoxidovým lepidlem, zbytek dílů spojují šrouby a matice o rozměru M3. Spojení dlaně a předloktí v zápěstí zaručuje kloub spojený jedním šroubem o rozměru M8 a délce 8 cm. Autor projektu InMoov poskytuje kompletní návod na zkonstruování robotické ruky dostupný online z odkazu [21].



Obr. 7.3 Náhled na rozložený 3D model předloktí [30]

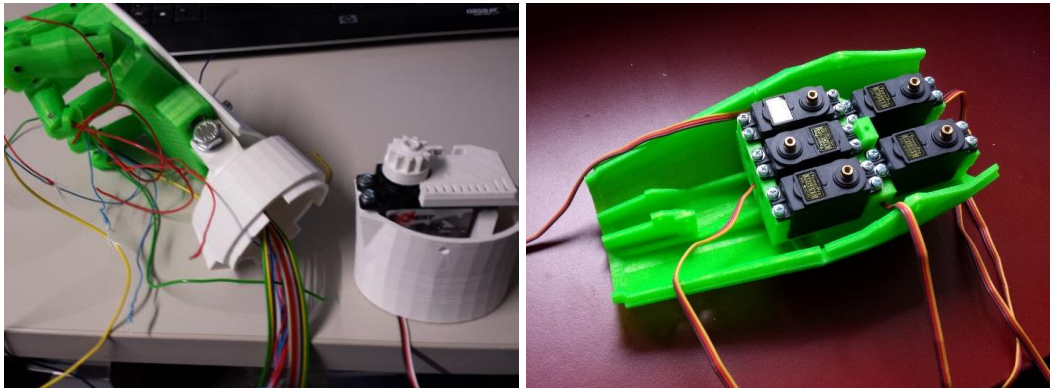
Na obrázku 7.4 je zobrazeno blokové schéma znázorňující zapojení komponent uvnitř robotické ruky, pro servomotory je uvedeno výchozí zapojení s ohledem na ovládaný prvek.



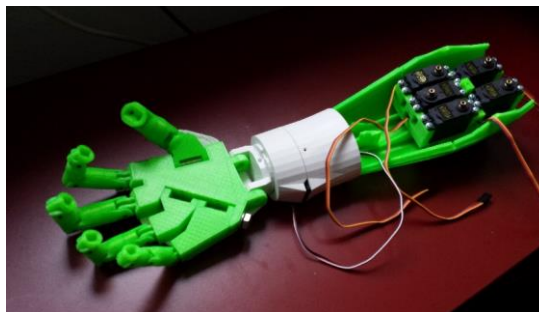
Obr. 7.4 Schéma zapojení hardwarových komponent

## 7.2 Osazení robotické ruky servomotory

Při konstruování robotické ruky proběhlo zavedení kabeláže, ovládacích lanek a osazení servomotorů. Servomotory jsou usazeny v lůžku a každý z nich je připevněn 4 šrouby o rozměru M3. Na obrázku 7.5 jsou zachyceny fotografie z osazování ruky, vlevo je zobrazený detail na dlaň a zápěstí, v němž je schovaný jeden servomotor, zbylých 5 serv je uloženo v lůžku v předloktí zachyceném na pravém snímku. Na obrázku 7.6 je pro větší názornost zachycena celá ruka po osazení. Pro osazení bylo použito 6 servomotorů MEX-654BB.



Obr. 7.5 Detail na osazení servomotorů



Obr. 7.6 Náhled na osazenou a smontovanou robotickou ruku

### 7.2.1 Servomotor MEX-654BB

Tento servomotor je vybaven digitálním řídicím obvodem. Výstupní hřídel se pohybuje v kuličkovém ložisku, poskytujícím větší přesnost, stabilitu a plynulejší chod. Jeho převodovka je vyrobena z kovu, což zaručuje nižší opotřebení, tudíž i větší životnost, a možnost vyššího zatížení, než kdyby byly převody plastové. Servo vyvine při napájecím napětí 6V tah až 11kg/cm, což je pro potřeby protetické ruky dostatečné. Některé další technické parametry jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce 7.1. [31]

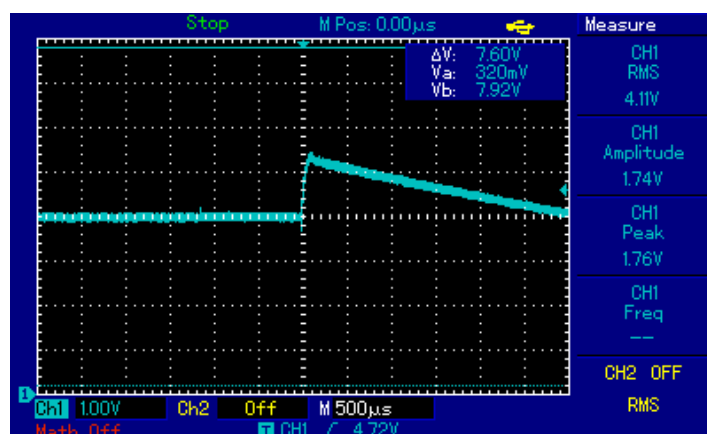
Tab. 7.1 Vybrané technické parametry servomotoru MEX-654BB

Délka	39,9 mm
Šířka	19,8 mm
Výška	37,6 mm
Hmotnost	41,9 g
Vstupní napětí	4,8-6 voltů
tah při 6 V	11 kg/cm
Rychlost při 6 V	0,14 sec / 60 °

### 7.3 Volba napájecího zdroje

Dalším důležitým aspektem při realizování projektu je volba vhodného napájecího zdroje. Zdroj musí být dostatečně tvrdý, aby byl schopen dodat potřebný proud do obvodu bez zbytečného poklesu napájecího napětí.

Směrodatným parametrem pro výběr napájení je spotřeba respektive proudový odběr servomotorů. Každý servomotor má maximální proudový odběr až 450 mA, při použití 6 servomotorů tedy dosáhne maximální zatížení zdroje hodnoty až 2,7 A. Dále je potřeba si uvědomit působení proudu odebíraného servomotory. Je potřeba rozlišovat proud na krátkodobý, trvající několik jednotek vteřin, způsobený ustáleným odběrem proudu při pohybu serva, proud mžikový, trvající řádově desetiny vteřiny, způsobený například mimořádným zatížením motoru při pohybu, a na proud špičkový. Tento špičkový proud, působící velmi krátce (řádově tisíce vteřiny), nelze pokrýt ani zapojením kondenzátoru do obvodu, protože jeho nástup je velice rychlý a obvykle několikanásobně překonává hodnotu klidového odběru proudu při ustáleném pohybu. Při použití nedostatečně tvrdého zdroje způsobují tyto proudové špičky pokles napájecího napětí v obvodu, což může vést například k resetování mikrokontroléru.



Obr. 7.7 Měření špiček odebíraného proudu na servomotoru

Na obrázku 7.7 je ukázán výstup z osciloskopu při měření odběru proudu servomotorem získaný měřením na osciloskopu, napětí 1 V odpovídá proudu 1 A. Na počátku měření je servomotor v klidovém stavu, po příchodu řídicího impulsu proud

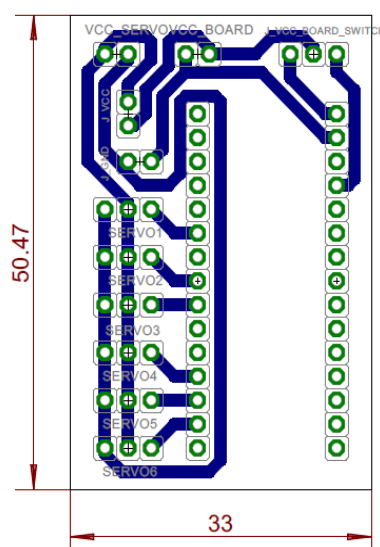


prudce vzrůstá až na maximální úroveň odpovídající blokovacímu proudu. S tím, jak se motor postupně roztáčí a překonává třecí síly a setrvačnost, klesá odebíraný proud až na stabilizovanou hodnotu odpovídající odběru proudu při rovnoměrném pohybu výstupní hřídele servomotoru. Při měření dosáhl špičkový proud krátkodobě hodnoty 1,2 A, po ustálení odběru byla změřena hodnota proudu 200 mA. Ustálený odběr proudu trvá, dokud je servomotor v pohybu – několik desetin až jednotek vteřiny v závislosti na rychlosti a úhlu otáčení.

Vlivem působení proudových špiček se tedy klasický síťový zdroj projevil při testování jako nedostatečný při použití 3 a více servomotorů. Navíc kvůli předejití problémů s resetováním mikrokontroléru na desce Arduino je vhodné mít oddělené napájení samotné desky od servomotorů. Deska Arduino je v tomto projektu připojena k počítači kvůli komunikaci a zpracování dat z ovladače Leap Motion, proto bylo zachováno napájení z počítače přes USB port, které je dostatečné, jelikož samotná deska odebírá řádově pouze několik desítek miliampér (cca 40 – 50 mA). Pro napájení servomotorů při testování a ožívování projektu byl tedy zvolen akumulátor, konkrétně olověný akumulátor s napětím 6V a kapacitou 10 Ah, který byl dostupný na UETE. Pro praktické využití však disponuje zbytečně velkou kapacitou, od které se odvíjí velké rozměry, vysoká hmotnost a cena. V budoucnu by tedy mohl být nahrazen menším a vhodnějším akumulátorem.

## 7.4 Návrh shieldu pro Arduino Nano

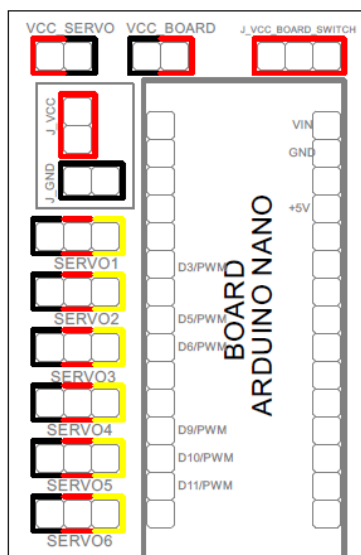
Shieldem se nazývá rozšiřující modul pro základní desku Arduina, který slouží především pro poskytnutí konektivity s vnějšími periferiemi. Při návrhu vlastního shieldu pro připojení servomotorů bylo stanoveno několik zásadních parametrů. Nejdůležitějším parametrem byla velikost celého modulu, kdy bylo potřeba zachovat co nejmenší rozměry, aby mohlo být celé Arduino Nano vloženo dovnitř robotické ruky. Dalšími požadavky bylo oddělené napájení pro servomotory se zemí spojenou s deskou a také jednoduchost provedení celého modulu.



Obr. 7.8 Návrh servo shieldu pro Arduino Nano



Vlastní návrh zobrazený na obr. 7.8 byl realizován s ideou zachování určité univerzality modulu tak, aby našel využití i v jiných aplikacích se servomotory. Vlevo nahoře se nachází piny pro oddělené napájení servomotorů. Hned pod nimi se nachází dvojice propojek. První s názvem J\_VCC spojuje napájecí vodič servomotorů s napájením celé desky. Je vhodný v případě užití pěti voltového napájení servomotorů, aby deska nemusela mít přivedené další vodiče. Druhý se jmenuje J\_GND a spojuje zemnicí vodič s nulovým potenciálem desky. Nahoře uprostřed se nachází samostatný přívod napájení pro desku. Vpravo se pak nachází přepínač pojmenovaný J\_VCC\_SWITCH. Ten umožňuje volbu přivedení napájecího napětí, kdy při propojení pravého kolíku se středním je napětí přiváděno na vstup +5V, zatímco spojením levého kolíku se středním je napětí přivedeno na vnitřní stabilizátor Arduina. Po levé straně se pak pod sebou nachází 6 vývodů pro servomotory, jelikož má deska Arduino Nano pouze 6 digitálních výstupů podporujících PWM režim. Jsou orientovány tak, že napravo se nachází datový vodič, uprostřed kladné napájecí napětí a vlevo zem. Pro lepší názornost a určení orientace napájecích kolíků i výstupů pro servomotory byl navržen barevný servisní potisk zobrazený na obr. 7.9.



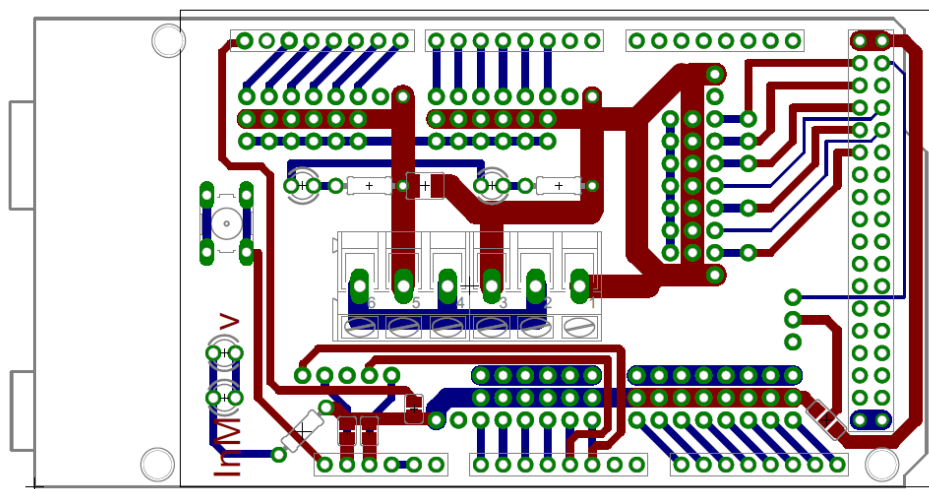
Obr. 7.9 Servisní potisk shieldu pro Arduino Nano

Celý modul má velikost pouze 33 x 50,5 mm a splňuje tedy požadavek na malé rozměry. S ohledem na jednoduchost modulu i na vlastní možnosti výroby je deska pouze jednostranná.

## 7.5 Shield pro Arduino Mega

Pro práci s modulem Arduino Mega byl použit shield dostupný na UETE. Jeho návrh je ukázán na obr. 7.10. Tento shield byl navrhován pro zachování maximální konektivity, jenž deska Arduino Mega zaručuje. Ve formě tří pinových kolíkových lišt sloužících jako konektory pro servomotory jsou zde vyvedeny všechny digitální piny podporující PWM režim a řada analogových pinů. V horní vrstvě (v návrhu červeně) jsou vedeny cesty kladné napájecí větve, které jsou zesíleny. Tím je dosaženo dobré

dimenzace cest vzhledem ke spotřebě servomotorů a k jejich maximálnímu počtu. Ve spodní vrstvě (v návrhu modře) se nacházejí zemní a signálové vodiče. Na desce se také nachází několik indikačních led diod.



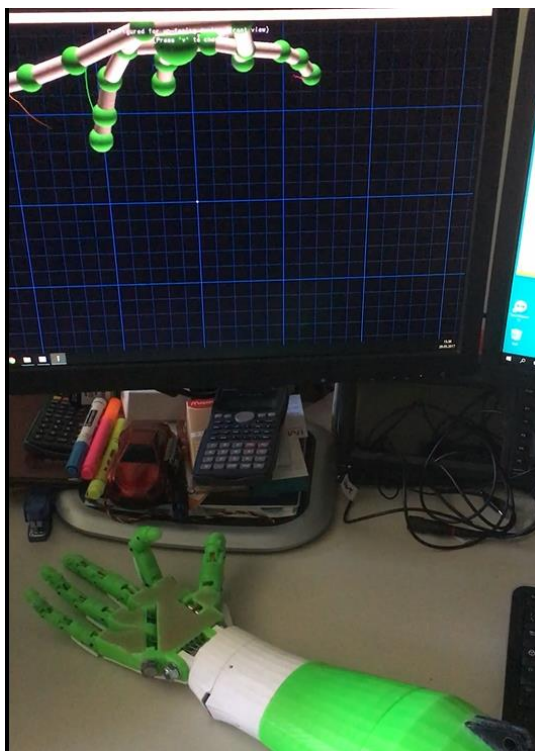
Obr. 7.10 Návrh shieldu pro Arduino Mega

## 7.6 Propojení s počítačem a oživení

Projekt je realizován ve vývojovém prostředí MyRobotLab. Nejprve je samozřejmě nutné program do počítače stáhnout z internetu, nejlépe z domovské stránky programu, a vybrat vhodnou verzi. Testování a ožívování ruky bylo prováděno ve starší verzi programu pro 32 bitový operační systém Windows s označením 1.0.107. Program se po stažení neinstaluje, pouze ho stačí rozbalit ze .zip archivu do libovolné složky a spustit pomocí aplikace myrobotlab.jar nacházející se uvnitř zvoleného adresáře.

Po spuštění aplikace je jako první krok potřeba nahrát do Arduina přichystaný software, který zaručuje komunikaci s deskou Arduina po virtuální sériové sběrnici rychlostí 115200 bit/s a poskytuje prostředí MyRobotLab možnost ovládat připojené periferie. Tento program, pojmenovaný MRLComm, je ve formě zdrojového kódu s příponou .ino přiložen v adresáři s aplikací MyRobotLab, lze jej také otevřít přímo v aplikaci po spuštění modulu pro Arduino. Kód je třeba zkopírovat a otevřít v softwaru Arduino IDE, přes který se provede naprogramování do mikrokontroléru. Každá verze prostředí MyRobotLab má vlastní modifikaci programu MRLComm, při využití jiné verze je nutné přehrát program v desce Arduina pro zaručení správné funkce.

Dalším krokem je samotné zprovoznění robotické ruky. K počítači musí být připojeny všechny periferie, včetně Arduina a ovladače Leap Motion. Po spuštění aplikace MyRobotLab je nejjednodušší použít skript v jazyce python, který aplikaci nakonfiguruje a spustí potřebné moduly, takže konfiguraci není potřeba provádět ručně. Skript se vloží ve formě textu do záložky „python“ (po spuštění aplikace 4. záložka zleva) a aktivuje se stiskem tlačítka „execute“. Během několika vteřin dojde k nakonfigurování aplikace a spuštění běhu celého projektu. Pro ukázkou je uveden obrázek 7.11, který ukazuje spuštěný vizualizér na popředí obrazovky počítače, při ohnutí ukazováčku došlo i k ohnutí stejného prstu robotické ruky.



Obr. 7.11 Ukázka funkčnosti projektu

### 7.6.1 Použitý skript

Tento skript, uvedený dále, slouží po spuštění aplikace MyRobotLab pro správné nakonfigurování všech modulů. Je napsaný v programovacím jazyce python, díky čemuž je v podstatě jednoduchý a snadno čitelný. První příkaz spustí službu InMoov pojmenovanou jako „inmoov“. Druhý příkaz spustí modul pravé ruky a nakonfiguruje 6 servomotorů – 5 pro prsty a šestý pro zápěstí. Také spustí modul pro Arduino, kterému se předá parametr vepsaný v závorce, určující, ke kterému fyzickému portu v počítači je připojena deska Arduino. Šestice dalších příkazů nastavuje globální limity pro každý ze servomotorů. Tyto limity jsou dány fyzickými proporcemi ruky, kdy každý prst se dokáže pohybovat pouze v určitém rozmezí úhlů, stejně tak zápěstí není konstruováno tak, aby bylo schopno se otočit o více než 90°. Jednotlivé příkazy jsou snadno čitelné, složené z několika klíčových slov oddělených tečkou. Prvně se v příkazu nachází název rutiny, zvolený jako „inmoov“, další klíčové slovo je modul, spuštěný touto rutinou, čili pravá ruka „rightHand“. Dalším slovem je konkrétní prvek modulu, v tomto případě anglické názvy jednotlivých prstů a název zápěstí („wrist“). Posledním klíčovým slovem v řetězci je konkrétní příkaz, zde daný slovem „setMinMax“, sloužící pro nastavení limitů, s parametry zapsanými v závorce, oddělenými čárkou. Po nastavení limitů se dále ve skriptu nachází příkaz „sleep“ s parametrem 1, který pouze čeká po dobu 1 sekundy, aby došlo k prodlevě pro zaručení dokončení konfigurace všech modulů. Další příkaz slouží pro spuštění modulu pro ovladač Leap Motion a pro spuštění aplikace snímající pohyb rukou nad ovladačem. Poslední příkaz slouží pro zastavení snímání, je však symbolem hash (#) vepsán jako poznámka a nebude tedy proveden.

Zde je vypsán zmiňovaný skript:

```

1  inmoov = Runtime.createAndStart("inmoov", "InMoov")
2  inmoov.startRightHand("COM3")
3  inmoov.rightHand.index.setMinMax(0,180)
4  inmoov.rightHand.thumb.setMinMax(30,135)
5  inmoov.rightHand.majeure.setMinMax(10,170)
6  inmoov.rightHand.ringFinger.setMinMax(40,165)
7  inmoov.rightHand.pinky.setMinMax(30,168)
8  inmoov.rightHand.wrist.setMinMax(45,135)
9  sleep(1)
10 inmoov.rightHand.startLeapTracking()
11 # inmoov.rightHand.stopLeapTracking()

```

## 7.7 Cenové rozpětí realizace práce

Na závěr práce je vhodné zmínit finanční náklady spjaté s realizací projektu, pro přehlednost jsou sjednocené v tabulce 7.2. Všechny ceny jsou spíše orientačního charakteru, vždy záleží na výběru konkrétního obchodu. Desky Arduino Nano i Arduino Mega byly pořízeny jako „klony“ originálního provedení, jelikož jsou šířeny zdarma, a tudíž se dají pořídit levněji než originály při zachování plné funkčnosti. Pro výrobu shieldu bylo použito chemie a základního materiálu z vlastních zásob, nejsou proto v tabulce vyceněny. Náklady na výrobu robotické ruky jsou spjaté především s hodinovou sazbou stroje. Nejnížší taxa stroje činí 100 Kč za hodinu práce, tisk dohromady zabral cca 45 hodin.

Tab. 7.2 Finanční náklady spjaté s realizací projektu

Deska Arduino Nano	190 Kč
Deska Arduino Mega	460 Kč
Ovladač Leap Motion	2400 Kč
Výroba shieldu pro Arduino Nano	40 Kč
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plošný spoj – chemie a deska 33 x 51 mm z vlastních zásob</li> <li>• Kolíkové lišty, 2 konektory 15 pinů, 3 zkratovací propojky</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0 Kč</li> <li>• 40 Kč</li> </ul>
Výroba shieldu pro Arduino Mega	80 Kč
Náklady na výrobu robotické ruky	4900 Kč
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Použitý materiál PLA</li> <li>• Tiskový čas 45h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 400 Kč</li> <li>• 4500 Kč</li> </ul>
6x Servomotor MEX	3000 Kč
Akumulátor olověný 6 V, kapacita 10 Ah	330 Kč
Ostatní materiál	200 Kč
<ul style="list-style-type: none"> <li>• dráty, šrouby, lanka, spojovací a jiný spotřební materiál</li> </ul>	
Celkové náklady	11600 Kč

## 8 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo bližší seznámení s projektem InMoov, s jeho přednostmi a možnostmi řízení a využití robotické ruky z tohoto projektu vyrobené za užití technologie 3D tisku a její řízení za pomoci ovladače pro virtuální realitu Leap Motion, platformy Arduino a softwarového vývojového prostředí MyRobotLab.

Práce se věnuje projektu InMoov a zmiňuje jeho počáteční účelu – protetiku. Přináší bližší pohled na technologii výroby robotické ruky pomocí 3D tisku a volbu vhodných materiálů. Popisuje jednotlivé komponenty použité pro řízení robotické ruky. Pro získání dostatečných znalostí pro realizaci práce jsou teoreticky rozebrány užité komponenty, servomotory jakožto pohybové jednotky a modul desky Arduino, který slouží k jejich řízení. Dále se práce věnuje ovladači pro virtuální realitu Leap Motion, jeho technickým možnostem a principu funkce, a počítačovému programu MyRobotLab poskytujícímu důležitou softwarovou podporu pro práci s jednotlivými prvky. V závěru se práce zabývá konkrétní realizací zadání.

Při realizaci práce proběhl v rámci semestrálního projektu průzkum realizovatelnosti řešení a výstupem byl prvotní návrh řízení systému, zobrazený v blokovém schématu na obrázku 7.1. Dále došlo k osazení robotické ruky servomotory, dráty a lanky a k prvotním testům. Nejprve byly testy prováděny na platformě Arduino Nano a proběhl tedy návrh a výroba shieldu pro připojení servomotorů. Tato platforma se při testech jevila jako dostatečná. Kvůli volbě řešení formou vloženého skriptu, který nakonfiguruje celou aplikaci MyRobotLab automaticky se však vyskytl problém s výchozí hardwarovou mapou, která je stavěná na platformu Arduino Mega. Tato mapa počítá se zapojením servomotorů na jiných pinech, než na kterých se nacházejí PWM výstupy na desce Arduino Nano. Při ruční konfiguraci lze tento problém obejít přesným nastavením zapojení výstupů, při automatizovaném řešení konfigurace se však tento problém nepodařilo vyřešit. Při ožiování projektu na platformě Arduino Mega se však nevyskytly žádné další komplikace a projekt byl úspěšně realizován. Při práci s deskou Arduino Mega byl využit shield dostupný na UETE.

# LITERATURA

- [1] How artificial limb is made - material, manufacture, making, used, parts, components, structure, procedure. *Madehow.com* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [www.madehow.com/Volume-1/Artificial-Limb.html](http://www.madehow.com/Volume-1/Artificial-Limb.html)
- [2] TERRY T. WOHLERS. *Wohlers report .: additive manufacturing and 3D printing state of the industry, annual worldwide progress report*. 2012. Fort Collins, Colo: Wohlers Associates, 2000. ISBN 0975442996.
- [3] BIOTISK SE POMALU DOSTÁVÁ ZE SFÉRY ČISTÉ SCIENCE FICTION DO REALITY. *3dees.cz* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.3dees.cz/biotisk-se-pomalu-dostava-ze-sfery-ciste-science-fiction-do-reality/>
- [4] About - Bionicohand. *Bionicohand.org* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <https://bionico.org/about/>
- [5] ABOUT US - Enabling The Future. *Enablingthefuture.org* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://enablingthefuture.org/about/>
- [6] Project InMoov. *InMoov: Open Source 3D printed Life-Size Robot* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://inmoov.fr/project/>
- [7] Technologie 3D tisku. *Pkmodel.cz* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.pkmodel.cz/3dtisk.html>
- [8] Fused Deposition Modeling. *3d-tisk.cz: Aditivní výroba & rapid prototyping* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.3d-tisk.cz/fused-deposition-modeling/>
- [9] Acrylonitrile butadiene styrene. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile\\_butadiene\\_styrene](https://en.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadiene_styrene)
- [10] Polylactic acid. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Polylactic_acid)
- [11] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0141-1.
- [12] Serva. *Pelikandaniel.com* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.pelikandaniel.com/?sec=page&id=22>
- [13] Bastlení - jak funguje modelářské servo. *Vlastikd.webzd.cz* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://vlastikd.webz.cz/bastl/serva.htm>
- [14] PROYECTOS : RECEPTOR RC ASISTIDO por PIC. *PicManía by RedRaven* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [http://picmania.garcia-cuervo.net/proyectos\\_rcrx\\_pic.php](http://picmania.garcia-cuervo.net/proyectos_rcrx_pic.php)



- [15] Arduino. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Arduino>
- [16] Arduino Nano. *Arduino* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardNano>
- [17] Hardware. *Arduino Radio Control* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://www.reseau.org/arduino/rc/index.php?n=Main.Connections>
- [18] Arduino Mega. *Arduino* [online]. [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>
- [19] Arduino MEGA 2560 & Genuino MEGA 2560. *Arduino* [online]. [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>
- [20] Arduino Mega Intro. *Instructables* [online]. 2015 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://www.instructables.com/id/Arduino-Mega-Intro/>
- [21] Hand and Forarm. *InMoov: Open Source 3D printed Life-Size Robot* [online]. [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://inmoov.fr/hand-and-forarm/>
- [22] FSR 400 Series Data Sheet. *Interlink Electronics* [online]. 2015 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: [http://www.interlinkelectronics.com/datasheets/Datasheet\\_FSR.pdf](http://www.interlinkelectronics.com/datasheets/Datasheet_FSR.pdf)
- [23] Senzory tlaku FSR-4xx. *Robodoupe: web nejen o robotice* [online]. 2014 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2014/senzory-tlaku-fsr-4xx/>
- [24] Leap Motion for Mac and PC. *Leap Motion: 3D Motion and Gesture Control* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <https://www.leapmotion.com/product/desktop>
- [25] Leap Motion. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Leap\\_Motion](https://en.wikipedia.org/wiki/Leap_Motion)
- [26] Getting Started with the Leap Motion SDK. *Leap Motion: Blog* [online]. 2014 [cit. 2017-06-06]. Dostupné z: <http://blog.leapmotion.com/getting-started-leap-motion-sdk/>
- [27] FAQs. *MyRobotLab* [online]. 2011 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://myrobotlab.org/faqs>
- [28] Python. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2016 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Python>
- [29] Sketch 3D: Hand | InMoov. *Inmoov.fr* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://inmoov.fr/sketch-3d-hand/>
- [30] Sketch 3D: Forarm | InMoov. *Inmoov.fr* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://inmoov.fr/sketch-3d-forarm/>
- [31] Servo Mex-645BB MG Digital. *E-shop Reichard: Modelsport* [online]. [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <https://eshop.reichard.cz/servo-mex-645bb-mg-digital.html>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

ABS	Akrylonitril butadien styren
DC	Direct current, stejnosměrný proud
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, elektronicky vymazatelná paměť určená pouze pro čtení
ESD	Electrostatic discharge, elektrostatický výboj
FDM	Fused Deposition Modeling
IR	Infrared, infračervený
PC	Personal Computer, osobní počítač
PLA	Polylactid acid, polylaktid
PWM	Pulse Width Modulation, pulzně šířková modulace
SRAM	Static Random Access Memory, Statická paměť
UETE	Ústav elektrotechnologie
USB	Universal Serial Bus, univerzální sériová sběrnice
UV	Ultra Violet, ultrafialový